NIR-Kunststoffidentifizierung im Recycling

Die NIR-Spektroskopie wird in Recyclingsystemen häufig zur automatisierten Kunststoffidentifizierung eingesetzt, da verschiedene Polymere im Nahinfrarotbereich unterschiedliche spektrale Signaturen aufweisen.

Inhaltsverzeichnis

Das industrielle Problem: Polymeridentifizierung im Recycling
Warum die Sortierung nach Polymertyp wichtig ist
Wie optische Sortierung in Recyclinganlagen funktioniert

Einschränkungen der NIR-Sortierung
Komplementäre Sensortechnologien im Kunststoffrecycling
Rolle tragbarer NIR-Systeme in Recycling-Workflows
Zukünftige Entwicklungen in der optischen Sortierung
Fazit

Das industrielle Problem: Polymeridentifizierung im Recycling

Moderne Recyclingsysteme müssen große Mengen an Post-Consumer-Kunststoffabfällen aus Verpackungen, Konsumgütern und Industrieprodukten verarbeiten. Im Gegensatz zu Metallen oder Glas sind Kunststoffe keine einzelne Materialklasse. Stattdessen enthalten Kunststoffabfallströme eine komplexe Mischung aus Polymeren mit unterschiedlichen chemischen Strukturen, Schmelzpunkten, Dichten und Verarbeitungsanforderungen.

Typische kommunale Kunststoffabfallströme enthalten Kombinationen aus:

- Polyethylenterephthalat (PET)
- Polyethylen hoher Dichte (HDPE)
- Polyethylen niedriger Dichte (LDPE)
- Polypropylen (PP)
- Polystyrol (PS)
- Mehrschichtlaminate
- technische Kunststoffe
- kontaminierte oder degradierte Materialien

Für Recyclinganlagen besteht die grundlegende technische Herausforderung daher in der **Polymeridentifizierung und -trennung**. Mechanische Recyclingprozesse erfordern relativ reine Polymerströme, um recycelte Pellets herzustellen, die die Verarbeitungs- und Leistungsanforderungen erfüllen.

Manuelle Sortierung kann den für industrielle Recyclingbetriebe erforderlichen Durchsatz nicht erreichen. Anlagen können **mehrere Tonnen Kunststoff pro Stunde** verarbeiten, wodurch automatisierte Identifizierungstechnologien unerlässlich sind.

Optische Sortiersysteme, die auf der **Nahinfrarot-Spektroskopie (NIR)** basieren, sind daher zur dominierenden Technologie für die Polymeridentifizierung in modernen Recyclinganlagen geworden.

Diese Systeme ermöglichen die Echtzeit-Identifizierung von Kunststoffmaterialien auf Hochgeschwindigkeitsförderbändern und somit die automatisierte Trennung von Polymerfraktionen während des Recyclingprozesses.

Warum die Sortierung nach Polymertyp wichtig ist

ten, instabilem Schmelzverhalten und inkonsistenter Produktqualität.

Jedes Polymer besitzt eine spezifische Kombination von Eigenschaften, die seine Anwendungen und Recyclinganforderungen bestimmen.

Beispiele hierfür sind:

Polymer	Typische Anwendungen	Schlüsseleigenschaften
PET	Getränkeflaschen, Lebensmittelverpackungen	hohe Festigkeit, gute Barriereeigenschaften
HDPE	Waschmittelflaschen, Behälter	Chemikalienbeständigkeit, Steifigkeit
LDPE	Folien, Beutel	Flexibilität, geringe Dichte
PP	Verschlüsse, Lebensmittelbehälter	hohe Ermüdungsbeständigkeit
PS	Verpackungen, Einwegartikel	Steifigkeit, Sprödigkeit

Tabelle: Gängige Polymere, die in NIR-Recyclingsystemen identifiziert werden

Wenn Polymere in Recyclingströmen gemischt werden, treten mehrere Probleme auf:

Inkompatible Schmelztemperaturen Zum Beispiel:

PET schmilzt bei etwa 250–260 °C
PE und PP schmelzen bei etwa 110–170 °C

Werden diese Materialien zusammen verarbeitet, können einige Polymere degradieren, während andere unzureichend geschmolzen bleiben.

Unvermischbarkeit von Polymerphasen

Die meisten gängigen Thermoplaste sind **unvermischbar**, d. h. sie bilden keine homogenen Mischungen. Stattdessen kommt es während der Verarbeitung zu einer Phasentrennung, die zu schwachen Materialstrukturen führt.

Qualitätsminderung

Gemischte Polymerströme erzeugen recycelte Materialien mit:

geringerer Zugfestigkeit
reduzierter Schlagzähigkeit
inkonsistentem Schmelzflussverhalten
variabler Farbe und Aussehen

Für hochwertige Recyclinganwendungen – wie das **Bottle-to-Bottle-PET-Recycling** – sind die Anforderungen an die Polymerreinheit besonders streng.

Automatisierte Sortiertechnologien zielen daher darauf ab, **Kunststoffabfälle in homogene Polymerfraktionen zu trennen**, um ein effizientes Downstream-Recycling zu ermöglichen.

Industrielle Kunststoffrecyclinglinien umfassen typischerweise mehrere Stufen der mechanischen und optischen Trennung.

Ein vereinfachter Prozessablauf umfasst:

Zerkleinerung und Größenreduzierung
Eingehende Kunststoffabfälle werden in kleinere, für die Sortierung geeignete Stücke zerkleinert.
Mechanische Vorsortierung
Technologien wie Siebe, Windsichtung und Dichtetrennung entfernen Verunreinigungen und trennen Materialien nach Größe oder Gewicht.
Förderbandbasierte optische Sortierung
Kunststofffragmente werden auf Hochgeschwindigkeitsförderbändern durch optische Detektionssysteme transportiert.
Materialidentifizierung
Sensoren analysieren jedes Element auf dem Förderband und bestimmen dessen Materialzusammensetzung.
Auswurfsystem
Hochgeschwindigkeits-Luftdüsen entfernen ausgewählte Materialien vom Förderband und trennen sie in verschiedene Ausgabeströme.

Optische Sortiereinheiten arbeiten kontinuierlich und müssen die Identifizierung in **Millisekunden** durchführen, während sich die Materialien schnell über das Förderband bewegen.

Der typische NIR-Detektionsworkflow:

1. Beleuchtung von Kunststoffmaterialien
2. Messung der reflektierten Strahlung.
3. Spektrale Klassifizierung mittels Referenzbibliotheken

In Recyclinganlagen werden verschiedene optische Technologien eingesetzt, darunter:

Nahinfrarot-Spektroskopie
Farbkameras
Hyperspektrale Bildgebung
Röntgensysteme

Unter diesen ist die **NIR-Spektroskopie die am weitesten verbreitete Methode zur Polymeridentifizierung**, da sie chemische Unterschiede zwischen Kunststoffen in Echtzeit erkennen kann.

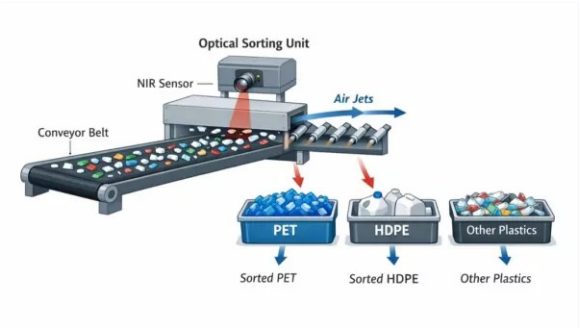

Abbildung: Industrielle Recyclinganlagen nutzen optische Sortiersysteme, um Kunststoffe zu identifizieren, während sich Materialien auf Förderbändern bewegen. NIR-Spektroskopie-Sensoren analysieren das reflektierte Spektrum jedes Objekts und lösen Luftdüsen aus, die Polymere in einzelne Materialströme trennen.

Die Nahinfrarot-Spektroskopie arbeitet im ungefähren Wellenlängenbereich von **700–2500 nm**. In diesem Spektralbereich weisen organische Materialien charakteristische Absorptionsmerkmale auf, die mit molekularen Schwingungen verbunden sind. Kunststoffe bestehen aus langkettigen Polymeren, die funktionelle Gruppen wie:

C–H
O–H
N–H
C=O

Diese chemischen Bindungen absorbieren aufgrund von **Schwingungsobertönen und Kombinationsbanden** spezifische Wellenlängen im Nahinfrarotbereich.

Wenn NIR-Strahlung eine Kunststoffoberfläche beleuchtet:

Das Material absorbiert spezifische Wellenlängen, die seiner molekularen Struktur entsprechen.
Die restliche Strahlung wird reflektiert oder gestreut.
Ein Spektrometer misst die reflektierte spektrale Signatur.

Jedes Polymer erzeugt einen **charakteristischen spektralen Fingerabdruck** basierend auf seiner chemischen Zusammensetzung.

Zum Beispiel:

Polyethylen zeigt starke C–H-Absorptionsmerkmale
PET weist zusätzliche Absorptionen im Zusammenhang mit Estergruppen auf
Polystyrol zeigt charakteristische Signaturen aromatischer Bindungen

In industriellen Sortiersystemen umfasst der Prozess typischerweise:

Beleuchtung

Hochintensive Halogenlampen oder NIR-LEDs beleuchten das Förderband und die Kunststoffmaterialien.

Spektrale Messung

Ein Spektrometer misst die reflektierte Strahlung von jedem Objekt auf dem Band.

Spektrale Klassifizierung

Softwarealgorithmen vergleichen das gemessene Spektrum mit einer Referenzbibliothek von Polymersignaturen.

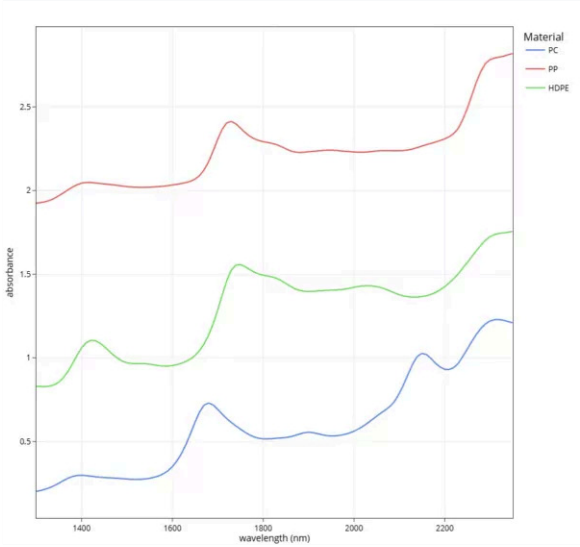

Abbildung: Verschiedene Polymere absorbieren Nahinfrarotstrahlung bei charakteristischen Wellenlängen aufgrund molekularer Schwingungen in chemischen Bindungen. Diese Absorptionsmuster erzeugen spektrale Fingerabdrücke, die es

Luftstrahl aus, um das Material in den entsprechenden Ausgabestrom umzuleiten. Der gesamte Detektions- und Klassifizierungsprozess muss innerhalb von **Zehntelmillisekunden** erfolgen.

Typische Polymere, die in Recyclingsystemen erkannt werden

Industrielle NIR-Sortiersysteme sind optimiert, um die häufigsten Polymere in Verpackungsabfallströmen zu erkennen.

PET (Polyethylenterephthalat)

PET wird häufig in Getränkeflaschen und Lebensmittelbehältern verwendet. NIR-Systeme erkennen PET anhand von Absorptionsmerkmalen, die mit Folgendem verbunden sind:

- Ester-Funktionsgruppen
- aromatischen Ringstrukturen
- C–H-Schwingungsmoden

Hochreine PET-Ströme sind für die Herstellung von **lebensmitteltauglichem recyceltem PET (rPET)** unerlässlich.

HDPE (Polyethylen hoher Dichte)

HDPE wird häufig verwendet für:

- Waschmittelflaschen
- Milchbehälter
- Industrieverpackungen

Sein NIR-Spektrum wird von starken **C–H-Obertonabsorptionen** dominiert, was eine zuverlässige Unterscheidung von PET und anderen Polymeren ermöglicht.

LDPE (Polyethylen niedriger Dichte)

LDPE wird hauptsächlich in flexiblen Folien und Beuteln verwendet.

Obwohl chemisch ähnlich wie HDPE, erfordern Unterschiede in Dichte und Morphologie oft **zusätzliche Sortierstrategien**, insbesondere für Folienmaterialien.

Polypropylen wird häufig verwendet in:

- Kappen und Verschlüssen
- Lebensmittelverpackungen
- Automobilkomponenten

PP kann durch charakteristische NIR-Merkmale identifiziert werden, die mit Methylgruppen entlang der Polymerkette verbunden sind.

PS (Polystyrol)

Polystyrol enthält aromatische Ringstrukturen, die im NIR-Bereich charakteristische spektrale Merkmale aufweisen. Diese Signaturen ermöglichen es Sortiersystemen, PS von Polyolefinen wie PE und PP zu unterscheiden.

Abbildung: Beispiele für gängige Verpackungspolymere, die in Recyclingströmen gefunden werden.

Einschränkungen der NIR-Sortierung

Trotz ihrer weiten Verbreitung weist die NIR-Spektroskopie mehrere wichtige Einschränkungen bei Recyclinganwendungen auf.

Das Verständnis dieser Einschränkungen ist entscheidend bei der Entwicklung von Sortiersystemen oder der Bewertung der Recyclingleistung.

Detektionsherausforderungen bei schwarzen Kunststoffen

Eine der bekanntesten Einschränkungen der NIR-Sortierung ist die Erkennung von **schwarzen Kunststoffen**.

Viele schwarze Kunststoffe enthalten **Rußpigmente**, die NIR-Strahlung über einen breiten Spektralbereich stark absorbieren.

Da das einfallende Licht absorbiert und nicht reflektiert wird, empfängt das Spektrometer ein unzureichendes Signal, um die Materialzusammensetzung zu bestimmen. Infolgedessen erscheinen schwarze Kunststoffartikel für herkömmliche NIR-Systeme oft **spektral unsichtbar**.

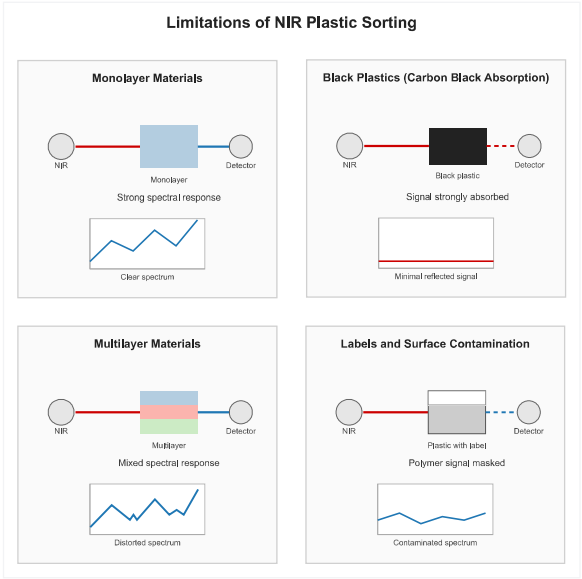

Abbildung: Die NIR-Spektroskopie identifiziert Kunststoffe durch Messung des reflektierten Infrarotlichts von Polymeroberflächen. Bestimmte Materialien reduzieren die Signalqualität, darunter Rußpigmente, die NIR-Strahlung absorbieren,

Energiegewinnung umgeleitet wurden. *Oberfläche teilweise bedecken).*

Mehrschichtige Verpackungsmaterialien

Moderne Verpackungen verwenden häufig **Mehrschichtlaminate**, die verschiedene Materialien kombinieren.

Beispiele hierfür sind:

- PET/PE-Laminate
- Aluminium-Polymer-Verbundwerkstoffe
- Barriereschichten

zweideutigen spektralen Signaturen
falscher Klassifizierung
Unfähigkeit, den dominanten Polymertyp zu bestimmen

Mehrschichtverpackungen bleiben eine der anspruchsvollsten Materialkategorien für optische Sortiersysteme.

Oberflächenkontamination und Etiketten

Kunststoffverpackungen enthalten oft:

Papieretiketten
Klebstoffe
Tinten
Lebensmittelreste
Schmutz oder Feuchtigkeit

Diese Oberflächenschichten können das gemessene Spektrum beeinflussen, indem sie:

das Polymersignal teilweise maskieren
zusätzliche spektrale Merkmale einführen
die Reflexionsintensität reduzieren

In industriellen Sortierumgebungen ist Kontamination unvermeidlich und muss bei der Systementwicklung und -kalibrierung berücksichtigt werden.

Robuste Klassifizierungsalgorithmen sind erforderlich, um eine zuverlässige Erkennung unter solchen Bedingungen aufrechtzuerhalten.

Komplementäre Sensortechnologien im Kunststoffrecycling

Da die NIR-Spektroskopie bekannte Einschränkungen aufweist, integrieren Recyclinganlagen zunehmend **mehrere Sensortechnologien**, um die Sortierleistung zu verbessern.

Raman-Spektroskopie

Die Raman-Spektroskopie liefert molekulare Informationen basierend auf **inelastischer Lichtstreuung**.

Im Vergleich zur NIR-Spektroskopie bietet die Raman-Spektroskopie mehrere Vorteile:

starke chemische Spezifität
Fähigkeit, schwarze Kunststoffe in einigen Fällen zu erkennen
Empfindlichkeit gegenüber der molekularen Struktur

Hyperspektrale Bildgebungssysteme kombinieren Spektroskopie mit räumlicher Bildgebung.

Anstatt ein einzelnes Spektrum pro Objekt zu messen, erfassen hyperspektrale Kameras **ein Spektrum für jedes Pixel im Bild**.

Dieser Ansatz ermöglicht:

- detaillierte Materialkartierung
- Erkennung kleiner Verunreinigungen
- verbesserte Klassifizierung gemischter Materialien

Hyperspektrale Systeme können besonders nützlich für komplexe Abfallströme sein, bei denen die Materialzusammensetzung über ein Objekt variiert.

Mittelinfrarot (MIR)-Systeme

Die Mittelinfrarot-Spektroskopie misst grundlegende molekulare Schwingungen anstelle von Obertönen.

Da MIR-Absorptionsmerkmale stärker und ausgeprägter sind als NIR-Merkmale, können MIR-Systeme Folgendes bieten:

- verbesserte chemische Diskriminierung
- bessere Erkennung schwieriger Materialien
- verbesserte Leistung bei bestimmten schwarzen Kunststoffen

MIR-Systeme erfordern jedoch typischerweise andere Detektortechnologien und optische Konfigurationen, was sich auf Kosten und Integrationskomplexität auswirken kann.

Rolle tragbarer NIR-Systeme in Recycling-Workflows

Während große Sortierlinien auf automatisierte optische Systeme angewiesen sind, spielen auch **tragbare NIR-Spektrometer** eine Rolle in Recyclingbetrieben.

Handheld-Systeme werden häufig verwendet für:

- Eingangskontrolle von Materialien
- manuelle Überprüfung von Polymertypen
- Qualitätskontrolle sortierter Fraktionen
- Identifizierung unbekannter Kunststoffe
- Auditierung von Recyclingströmen

Zum Beispiel können Recyclingingenieure tragbare Spektrometer verwenden, um:

- die Polymerzusammensetzung in Ballenmaterialien zu bestätigen
- Verunreinigungen in recycelten Pellets zu erkennen

- Materialrückgewinnungsanlagen (MRFs)
- Recyclinganlagen
- Kunststoffverarbeitungsbetrieben
- Abfallsammelstellen

Da tragbare Systeme sofortiges Feedback liefern, können sie die **Prozessüberwachung und Fehlerbehebung** innerhalb von Recycling-Workflows unterstützen.

Zukünftige Entwicklungen in der optischen Sortierung

Das anhaltende Wachstum des Kunststoffrecyclings treibt die kontinuierliche Entwicklung optischer Materialidentifizierungstechnologien voran.

Mehrere Trends prägen die Zukunft der Sortiersysteme.

Verbesserte Erkennung schwarzer Kunststoffe

Neue Pigmentformulierungen und Sensortechnologien werden entwickelt, um die Erkennbarkeit schwarzer Kunststoffe zu verbessern.

Beispiele hierfür sind:

- alternative Farbstoffe mit reduzierter NIR-Absorption
- erweiterte spektrale Detektionsbereiche
- Integration komplementärer Sensortechnologien

Diese Entwicklungen zielen darauf ab, das große Volumen an schwarzem Kunststoff zu reduzieren, das derzeit von hochwertigen Recyclingströmen ausgeschlossen ist.

Fortschrittliche spektrale Klassifizierung

Maschinelle Lernmethoden werden zunehmend eingesetzt, um die Klassifizierungsgenauigkeit in komplexen Abfallströmen zu verbessern.

Fortschrittliche Algorithmen können:

- Kontaminationen kompensieren
- gemischte Materialien identifizieren
- sich an Variationen im Verpackungsdesign anpassen

Diese Ansätze können die Robustheit optischer Sortiersysteme unter realen industriellen Bedingungen verbessern.

Integration mehrerer Sensormodalitäten

NIR-Spektroskopie
Hyperspektrale Bildgebung
Raman-Spektroskopie
visuelle Bildgebung

Durch die Kombination komplementärer Informationsquellen können diese Systeme eine zuverlässigere Materialidentifizierung erreichen.

Verbesserte Rückverfolgbarkeit von Kunststoffmaterialien

Mit der Weiterentwicklung der regulatorischen Rahmenbedingungen für das Recycling wächst das Interesse an der **Materialrückverfolgbarkeit**.

Optische Identifizierungstechnologien können eine Rolle bei der Überprüfung von Polymertypen und der Verfolgung recycelter Materialien entlang der gesamten Wertschöpfungskette spielen.

Verbesserte Materialidentifizierungsfähigkeiten können höhere Recyclingquoten und effizientere Kreislaufmaterialsysteme unterstützen.

Fazit

Die Nahinfrarot-Spektroskopie hat sich zu einer zentralen Technologie in modernen Kunststoffrecyclingsystemen entwickelt. Durch die schnelle, berührungslose Identifizierung von Polymertypen auf Hochgeschwindigkeitsförderbändern ermöglichen NIR-basierte Sortiersysteme Recyclinganlagen, gemischte Kunststoffabfälle in nutzbare Polymerfraktionen zu trennen.

Obwohl die Technologie Einschränkungen aufweist – insbesondere bei schwarzen Kunststoffen, Mehrschichtverpackungen und kontaminierten Materialien – bleibt sie die dominierende Lösung für die automatisierte Polymeridentifizierung in Recyclinganlagen.

Komplementäre Sensortechnologien wie Raman-Spektroskopie, hyperspektrale Bildgebung und Mittelinfrarot-Systeme werden zunehmend neben NIR eingesetzt, um diese Herausforderungen zu bewältigen.

Da sich optische Sortiertechnologien ständig weiterentwickeln, wird erwartet, dass Verbesserungen im Sensordesign, in der Spektralanalyse und in der Multi-Technologie-Integration die Effizienz und Zuverlässigkeit der Polymeridentifizierung in industriellen Recycling-Workflows weiter steigern werden.

Ihr direkter Draht zu uns

Haben wir Ihr Interesse geweckt? Senden Sie uns Ihre Anfrage!

KONTAKT

Solid Scanner

Telefon:
+49 (89) 209 693 39

E-Mail:
info@solidscanner.com

Newsletter

Erhalten Sie 2-3 Mal im Jahr neue Anwendungsideen für unsere Produkte, Informationen über neue Hard- und Software sowie Tipps & Tricks zur Verwendung von NIR-Sensoren.

Name *

E-Mail *

ZUM NEWSLETTER ANMELDEN

©2026 · Solid Scanner